

---

# Новые математические методы и алгоритмы создания систем противоаварийного управления электроэнергетических систем

---

**Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.**  
(МЭС Центра – филиал ОАО «ФСК ЕЭС»)

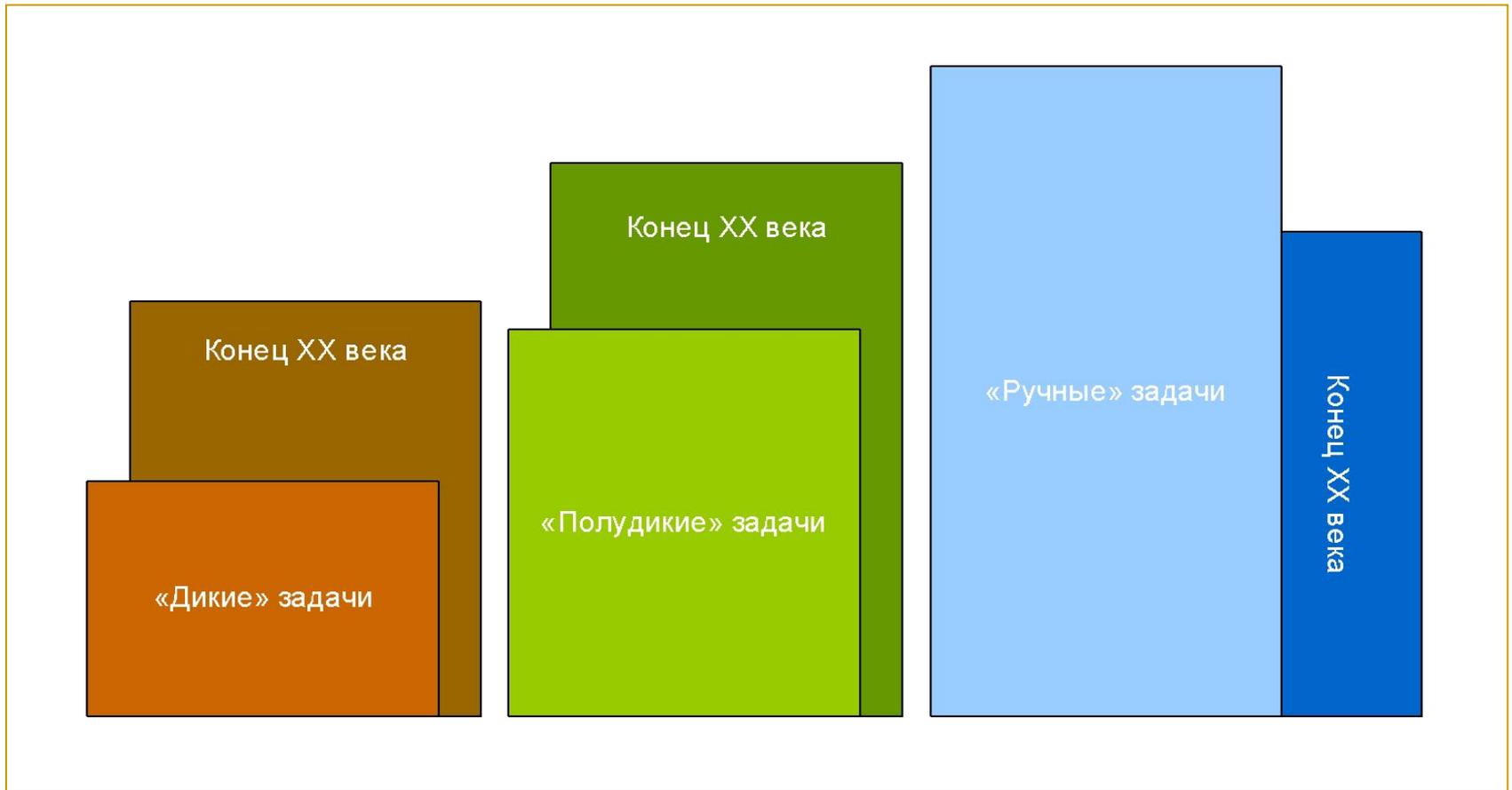


Международная научно-техническая конференция

**Современные направления развития систем  
релейной защиты и автоматики энергосистем**

Москва, 7-10 сентября 2009

# Влияние развития компьютерных технологий на решение трудных математических задач



## «Проклятие размерности»?

Матрица Google

$10^{10} \times 10^{10}$

Для ранжирования сайтов решается задача PageRank: *определение собственного вектора стохастической матрицы Google*

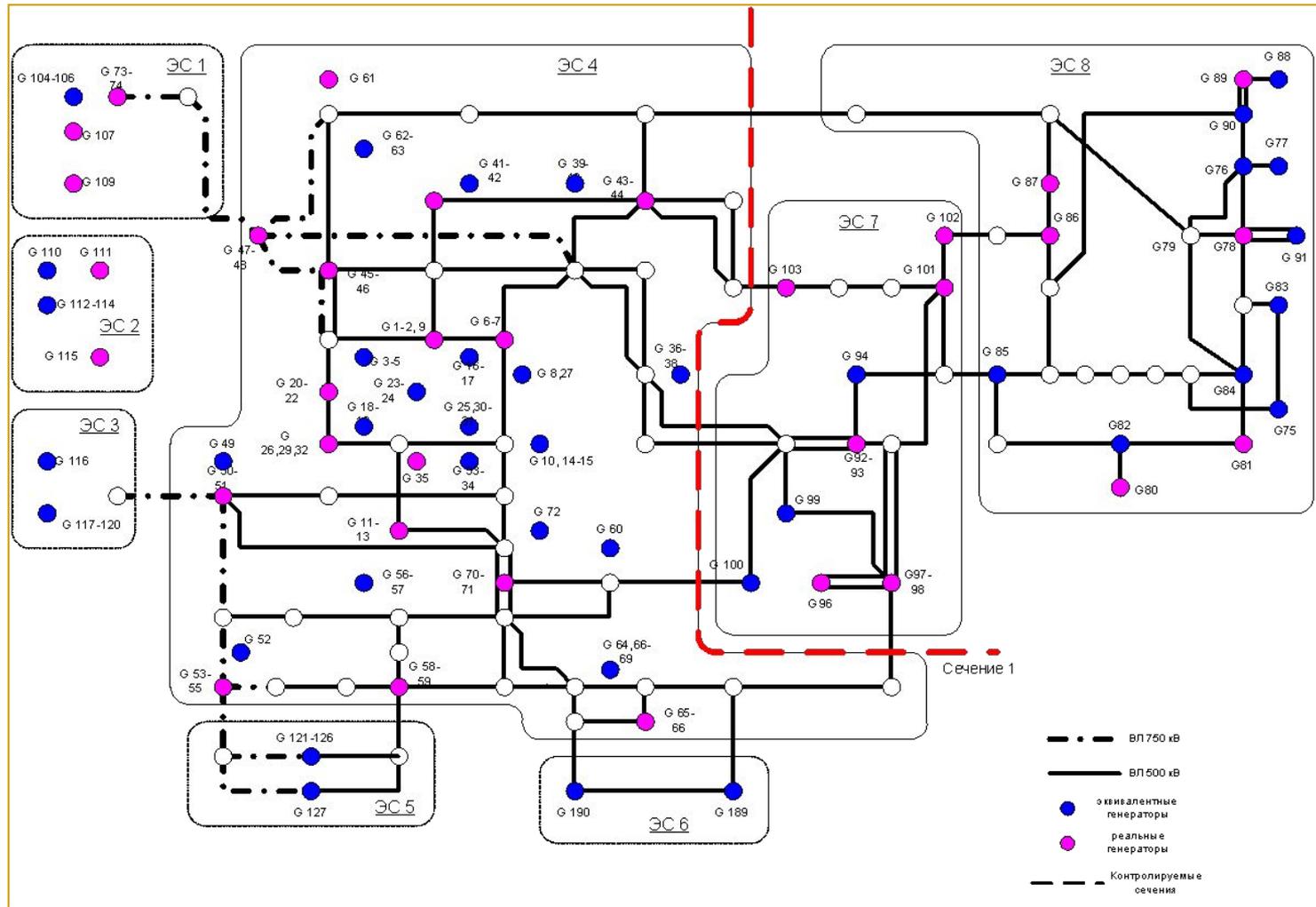


## Математические методы и алгоритмы, активно исследуемые и внедряемые в практику энергосистем

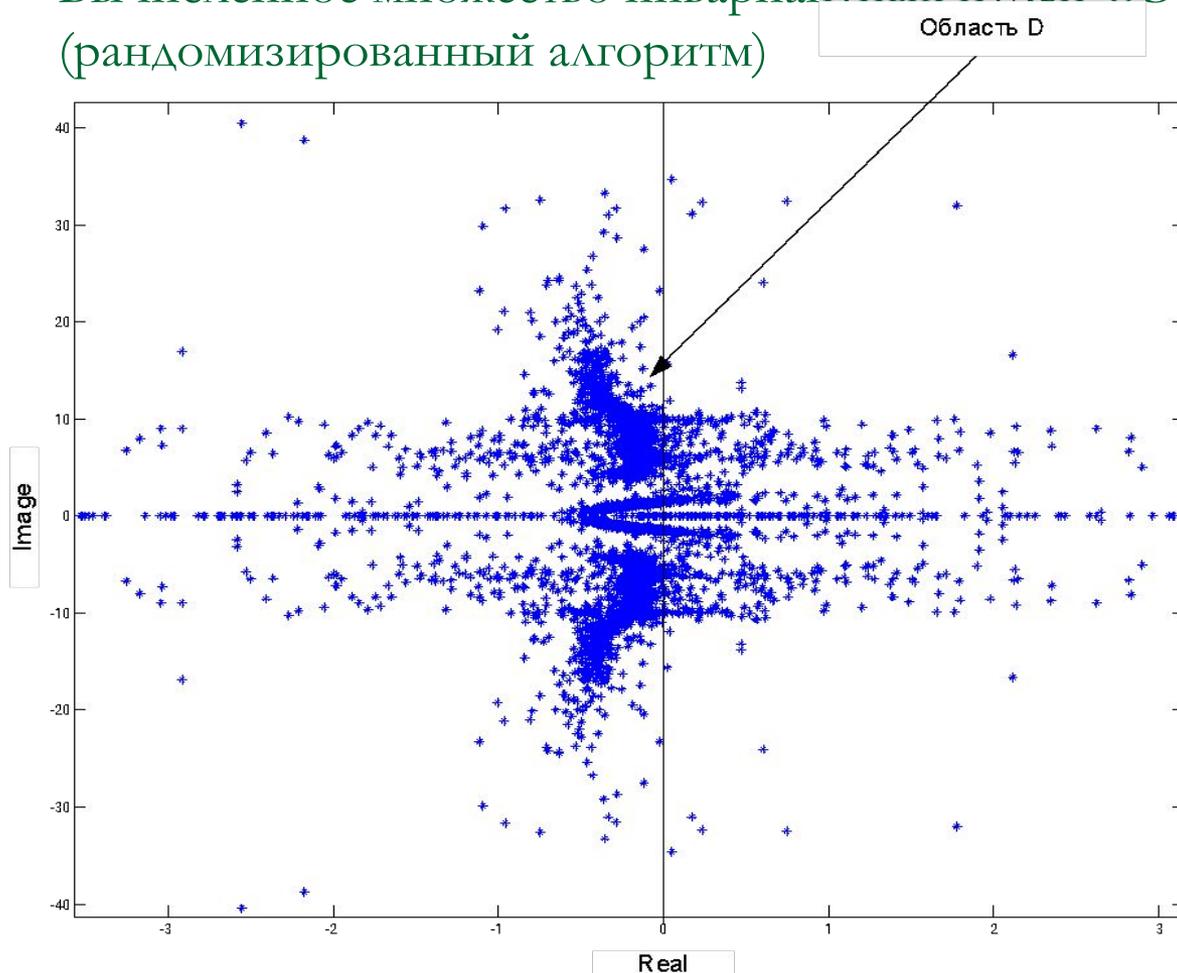
- модальные методы
- методы подпространств Крылова
- алгебро-дифференциальные системы
- робастные  $H_2/H_{\infty}$  методы
- генетические алгоритмы
- нейро-нечеткие алгоритмы
- вейвлет-анализ
- прогнозирование с моделью
- адаптивные и самоорганизующиеся системы
- рандомизированные алгоритмы
- методы нуль-пространств (делителей нуля)
- методы символической математики (компьютерной алгебры)



# Вычисление инвариантных нулей модели ОЭС Центра (286 узлов, 531 ветвь, 129 генераторов)



## Вычисленное множество инвариантных нулей ОЭС Центра (рандомизированный алгоритм)



### Инвариантные нули

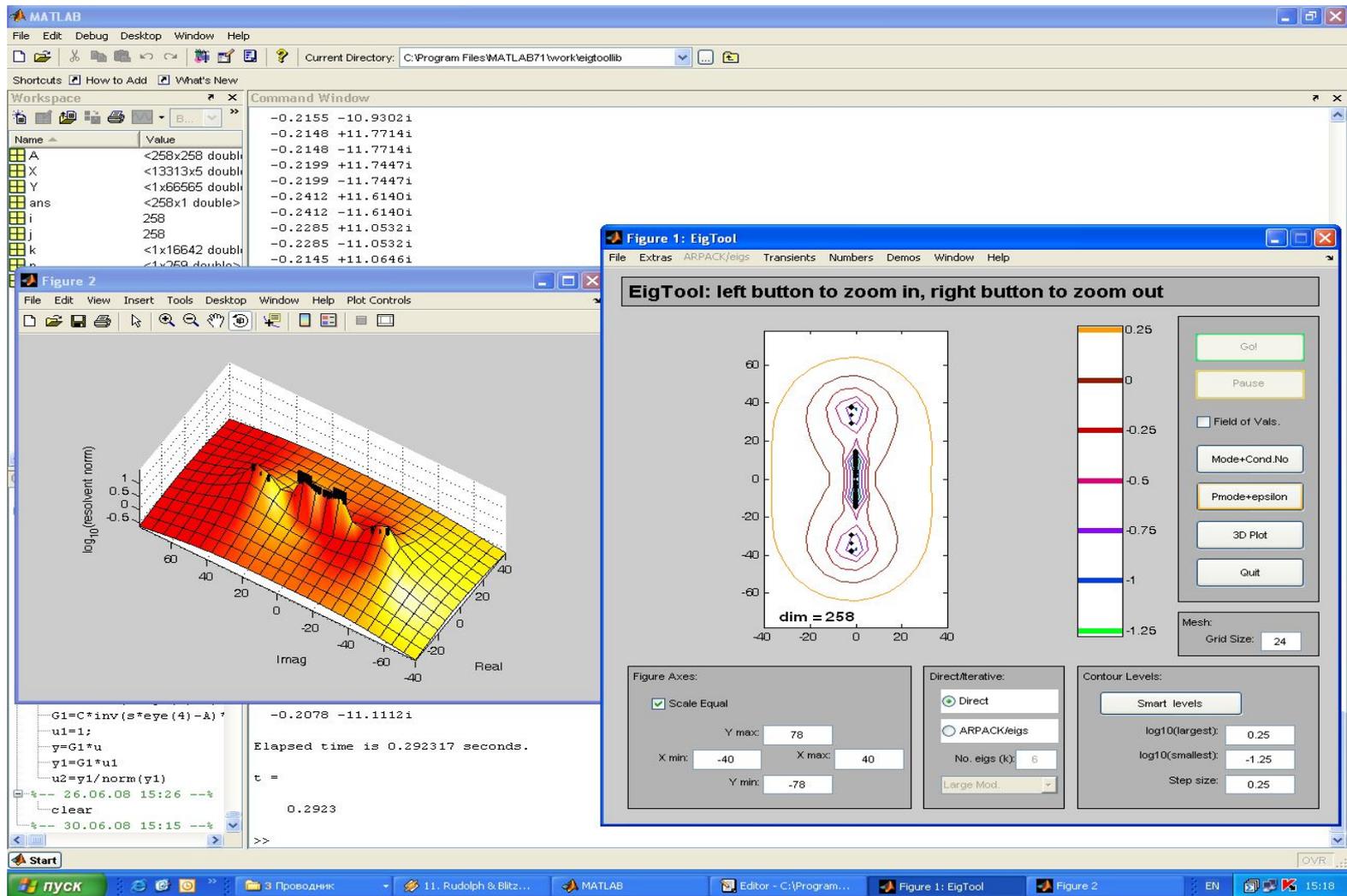
определяют частоты и фазы внешних управляющих воздействий и/или возмущений, на которых происходит «запирание» системы. Особенно опасными являются нули с положительными действительными частями. Их наличие может приводить к существенным «провалам» кривых переходных процессов.



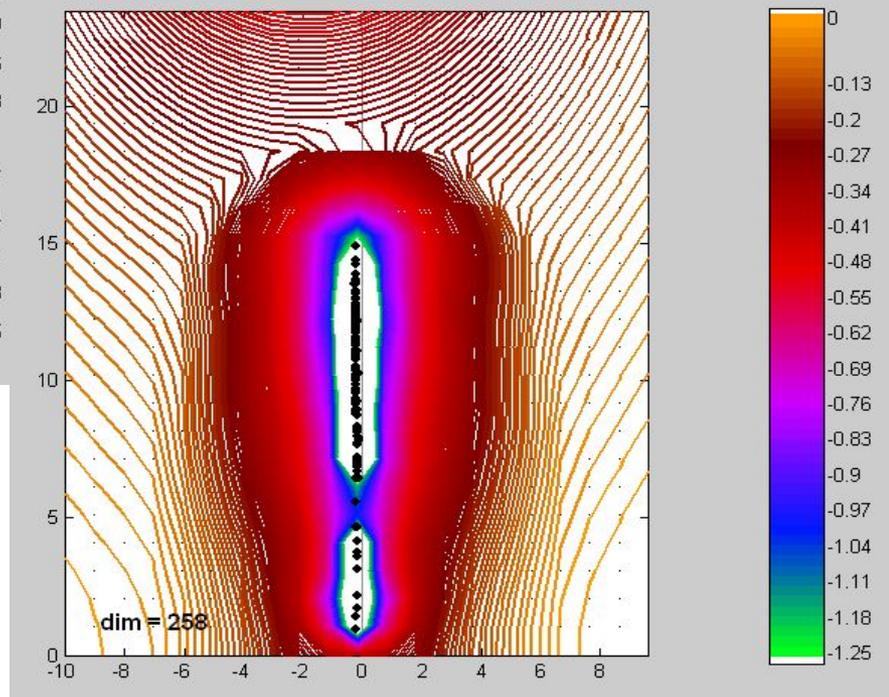
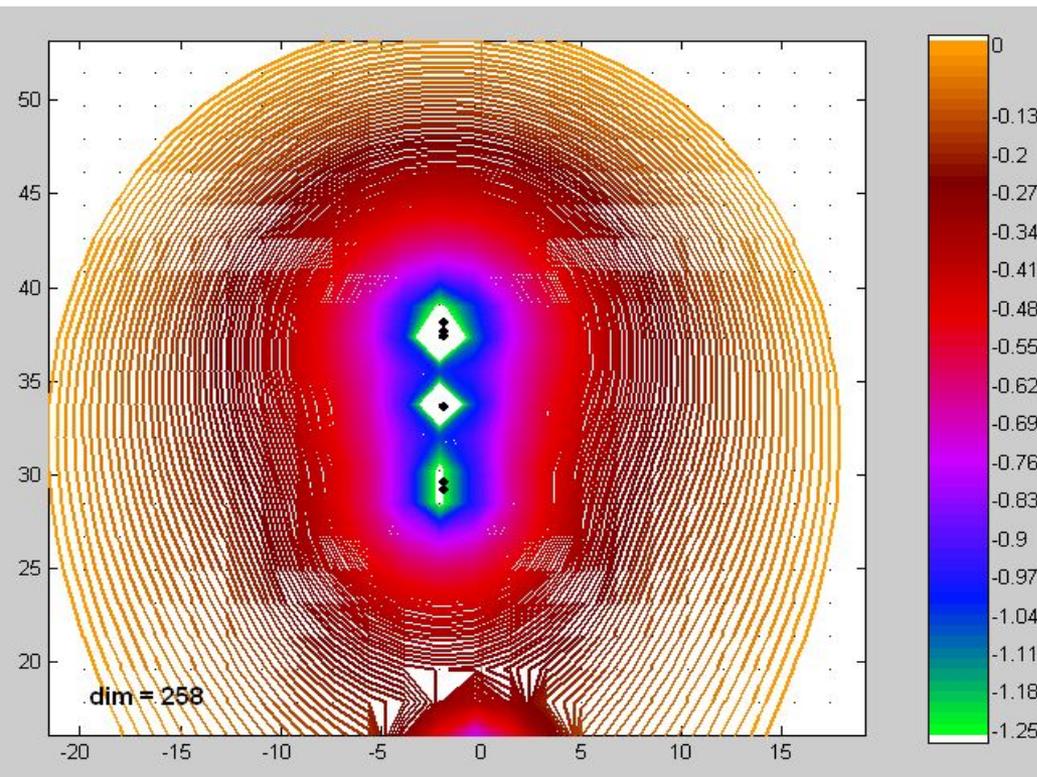
- методы некоммутативной алгебры
- методы алгебраической и проективной геометрии
- методы ковариационного управления
- метод псевдоспектров
- специальные матричные функции (матричные сигнум-функции, обобщенные и полиномиальные пучки матриц)
- хаотические динамические системы
- фракталы
- новые методы линеаризации нелинейных систем



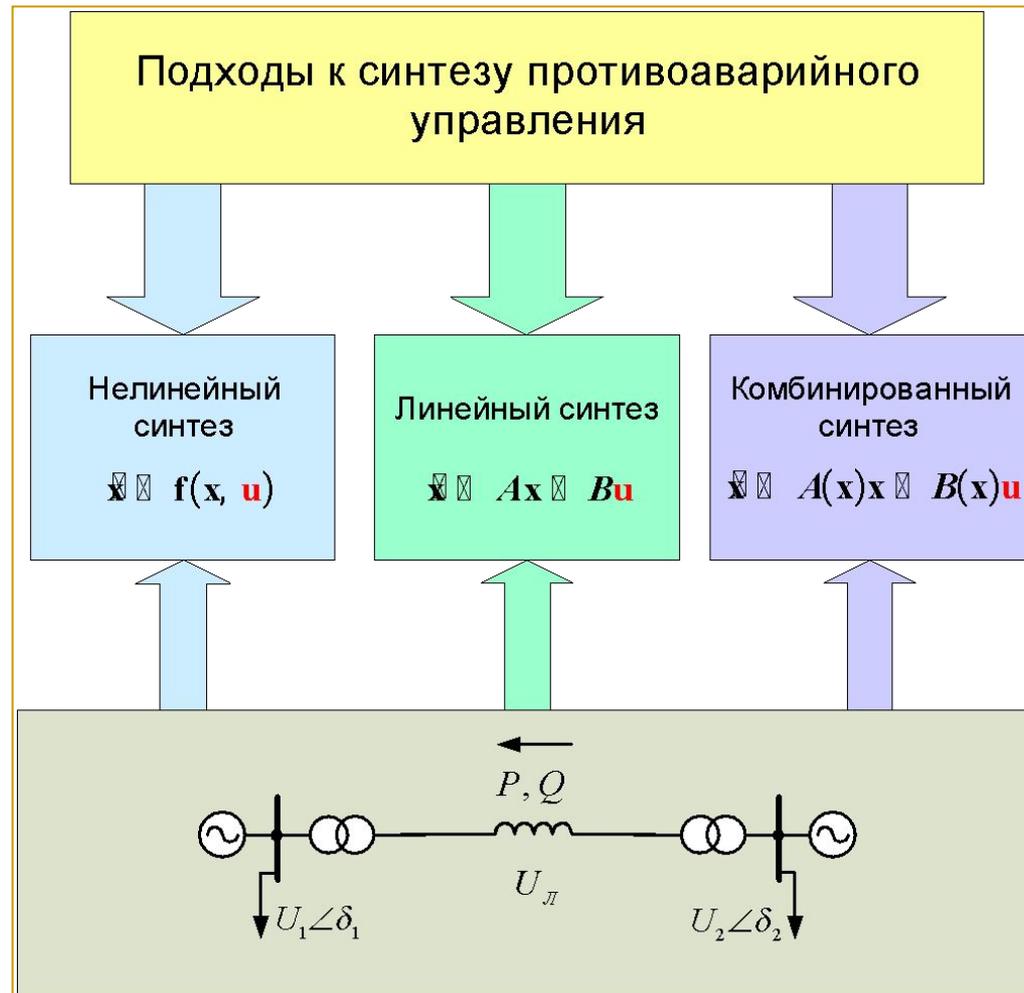
# Псевдоспектр модели ОЭС Центра при оценке запасов по статической устойчивости в условиях неопределенности (интерфейс eigtool)



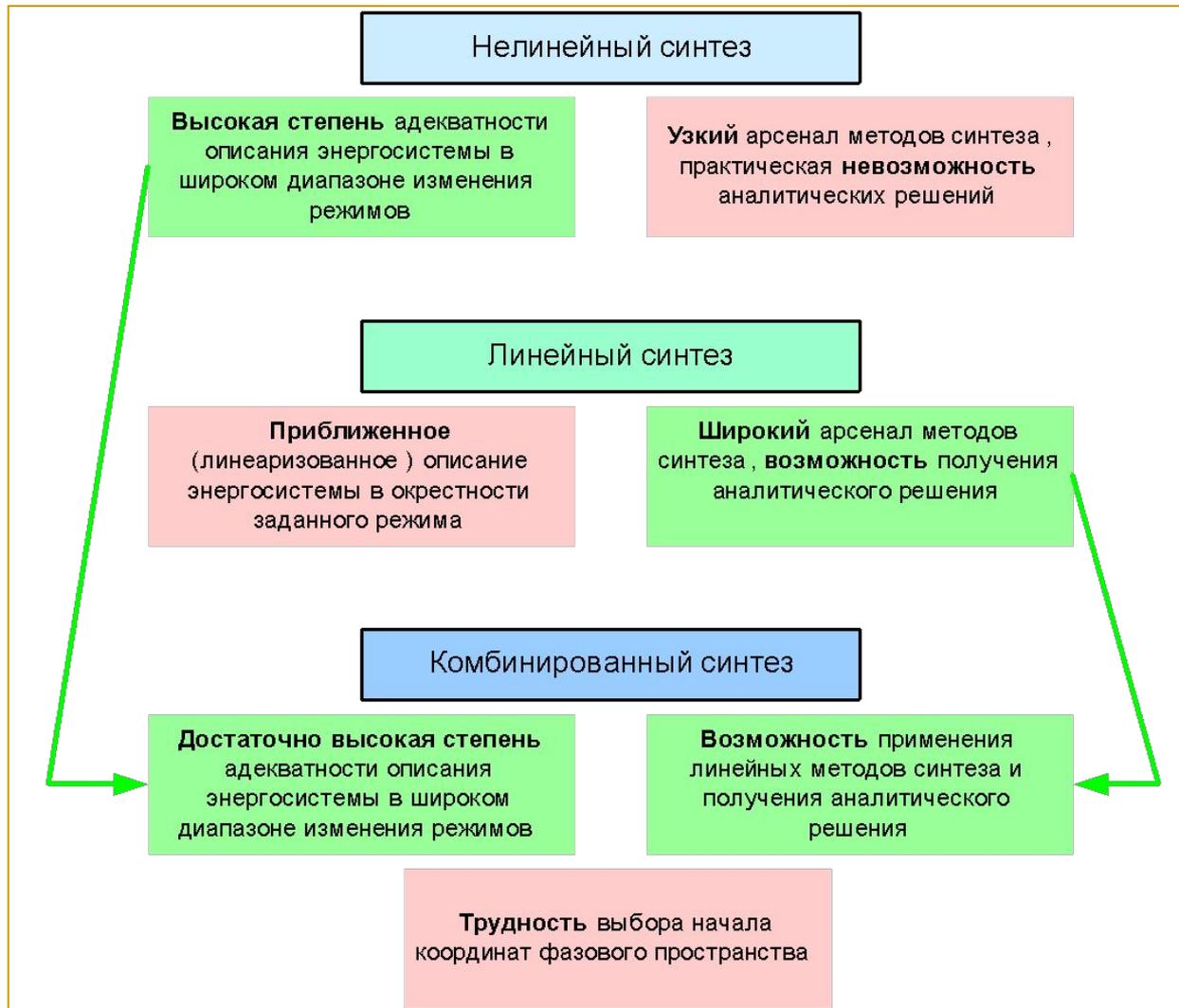
# Детализация псевдоспектра модели ОЭС Центра



# Противоаварийное управление (ПАУ)



# Достоинства и недостатки подходов



## Нормальные формы Пуанкаре

$$\dot{x} = f(x) \quad x = X_2 \quad X_3 \quad \dots$$

## Проективные модели

$$x = \frac{qx}{1+x}$$

$$\frac{d_q x}{dt} = A_q x + B_q x$$

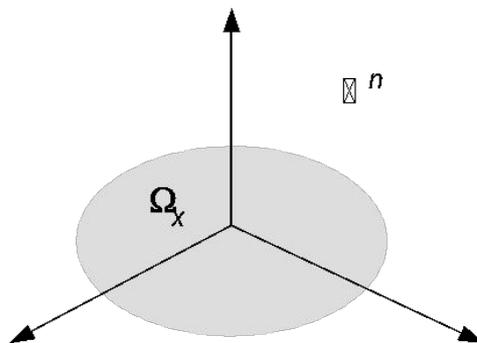
## Аффинные модели

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u$$

$$B(x) = B_0 + \bar{B}(x), \quad B_0 = \text{const}$$



# Управляемость аффинной системы и преобразование к управляемой форме Фробениуса



$$\forall x \in \Omega_x: \text{rank } C(x) = n$$

$$C(x) = \left[ B(x) \mid A(x)B(x) \mid A^2(x)B(x) \mid \dots \mid A^{n-1}(x)B(x) \right]$$

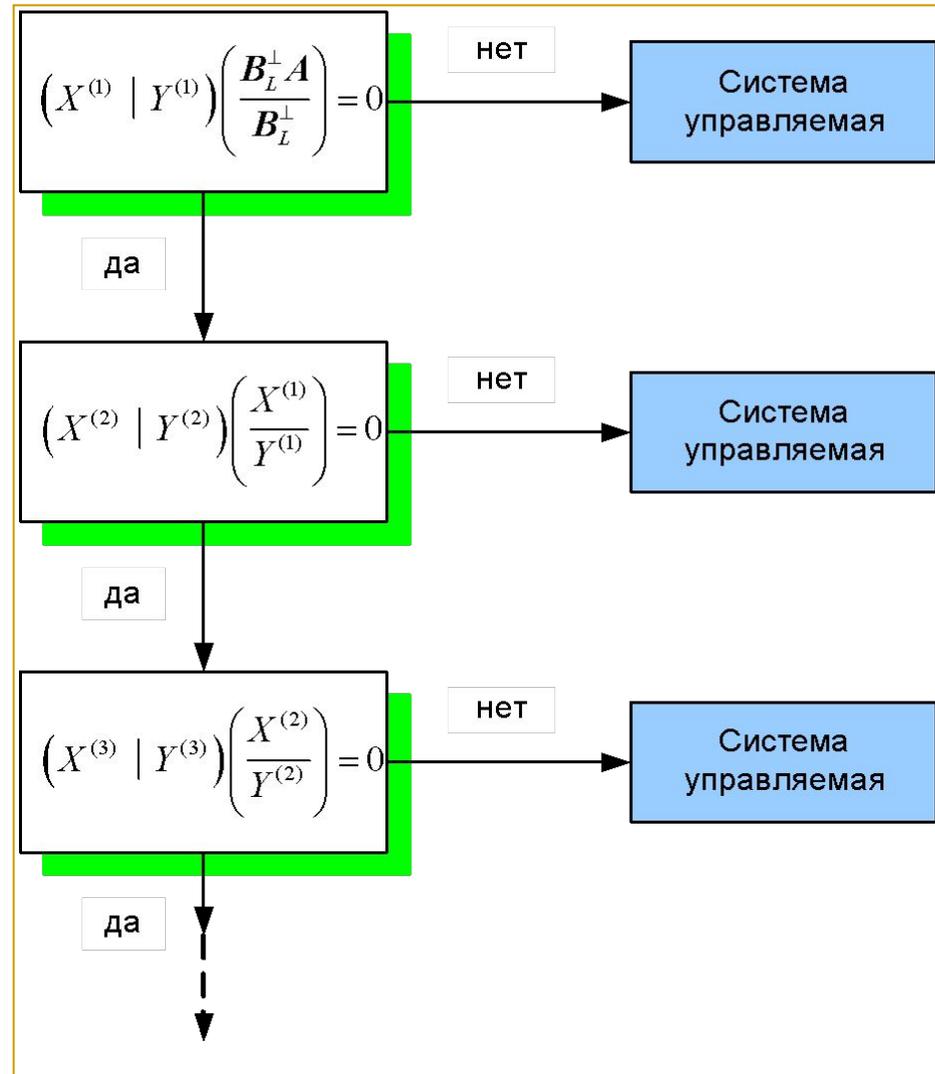
$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \alpha_0(x) & \alpha_1(x) & \alpha_2(x) & \dots & \alpha_{n-1}(x) \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u$$



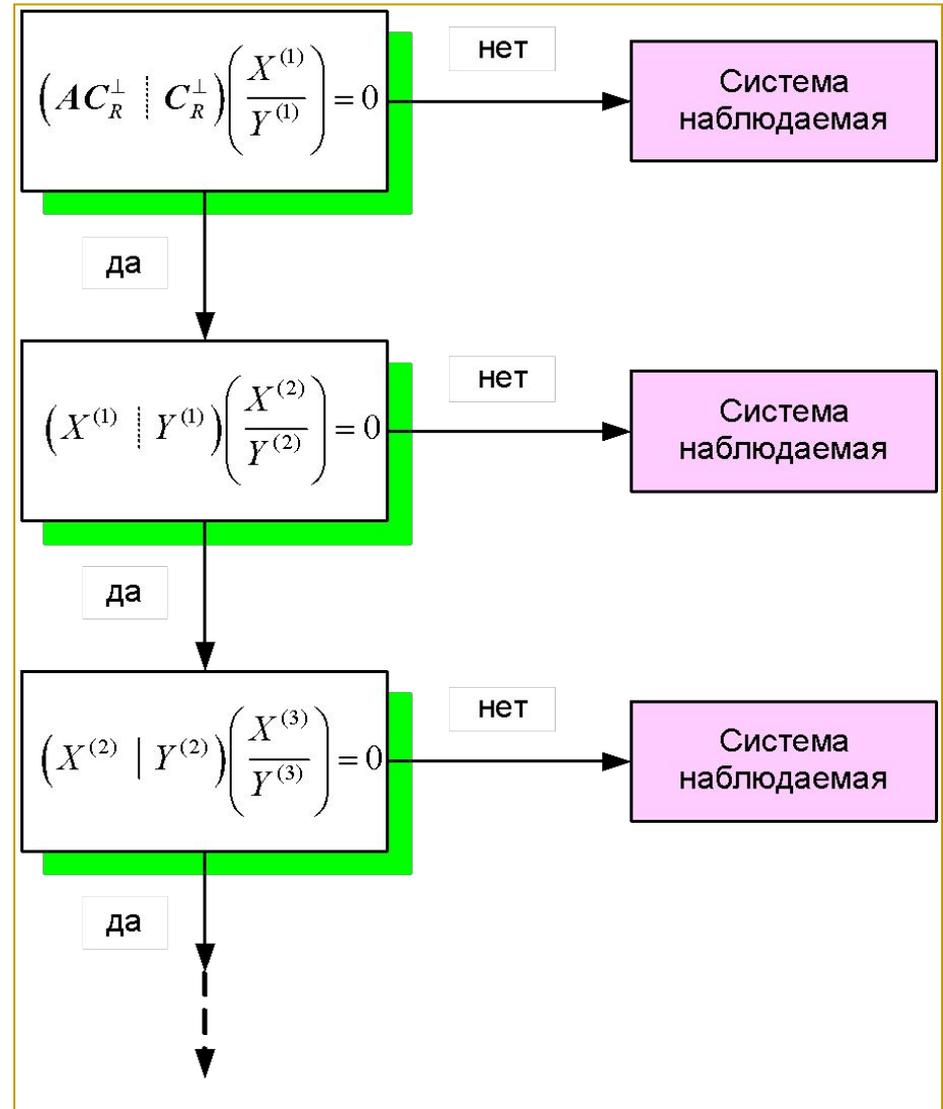
# Рекурсивный тест на управляемость энергосистемы с аффинной моделью

$B_L^{\wedge} A$	0	0	L	0	0
$B_L^{\wedge}$	$B_L^{\wedge} A$	0	L	0	0
0	$B_L^{\wedge}$	$B_L^{\wedge} A$	L	0	0
0	0	$B_L^{\wedge}$	0	M	0
M	M	M	0	$B_L^{\wedge} A$	0
0	0	0	L	$B_L^{\wedge}$	0

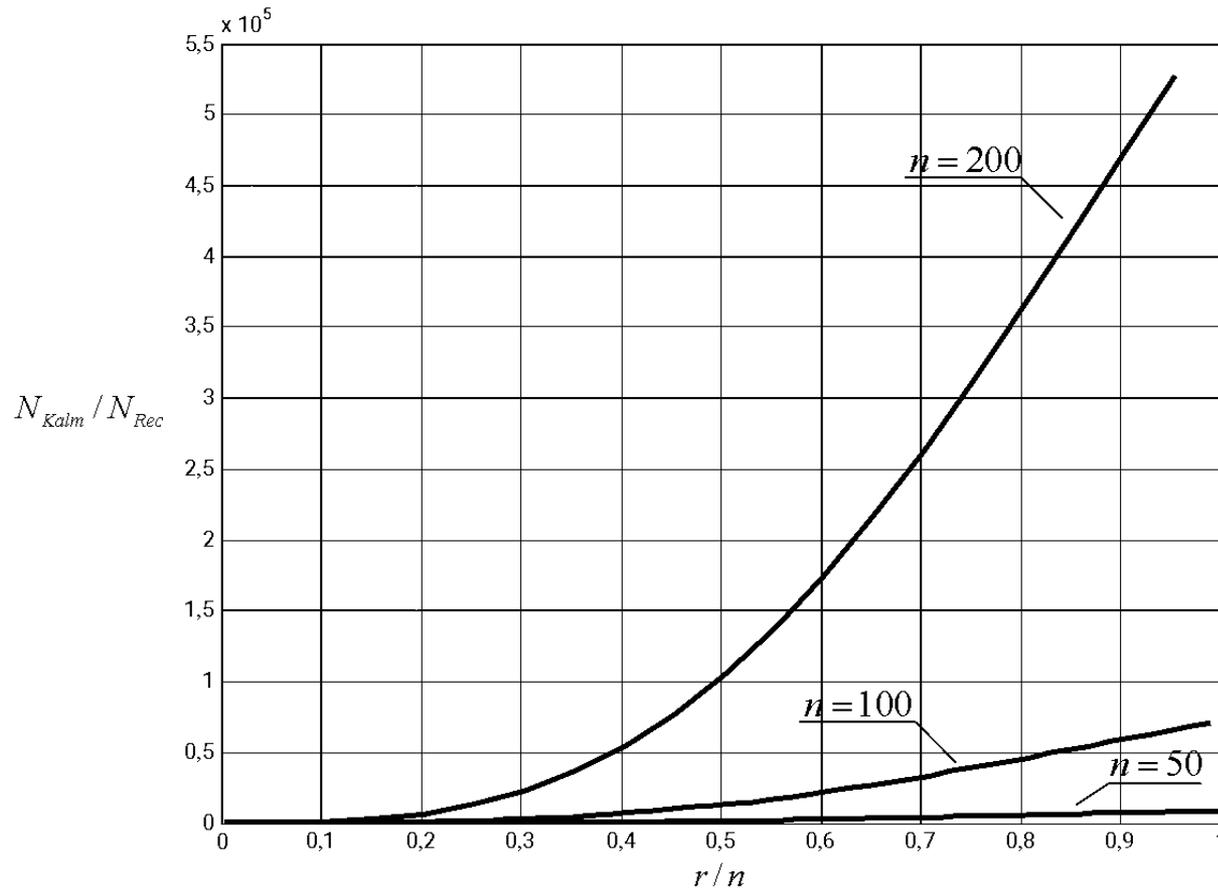


# Рекурсивный тест на наблюдаемость энергосистемы с аффинной моделью

$AC_R^A$	$C_R^A$	$0$	$L$	$0$	$0$
$0$	$AC_R^A$	$C_R^A$	$L$	$0$	$0$
$0$	$0$	$AC_R^A$	$O$	$M$	$M$
$M$	$M$	$M$	$O$	$C_R^A$	$0$
$0$	$0$	$0$	$L$	$AC_R^A$	$C_R^A$



## Вычислительные затраты

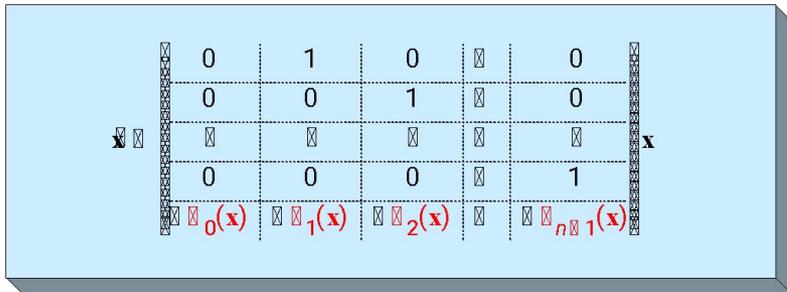


При увеличении размерности системы и отношения «число входов (выходов) / число состояний» рекурсивные тесты позволяют существенно сократить вычислительные затраты.

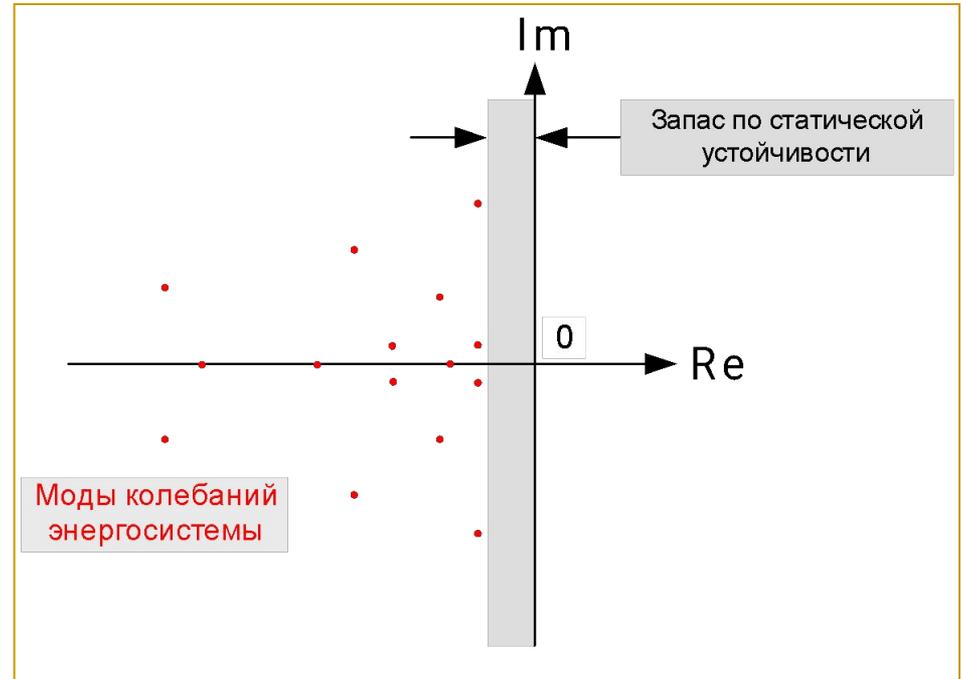
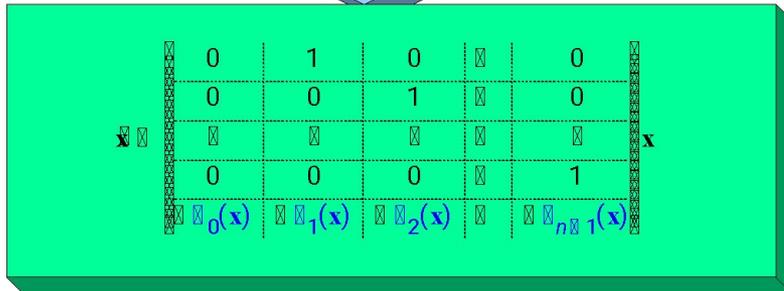




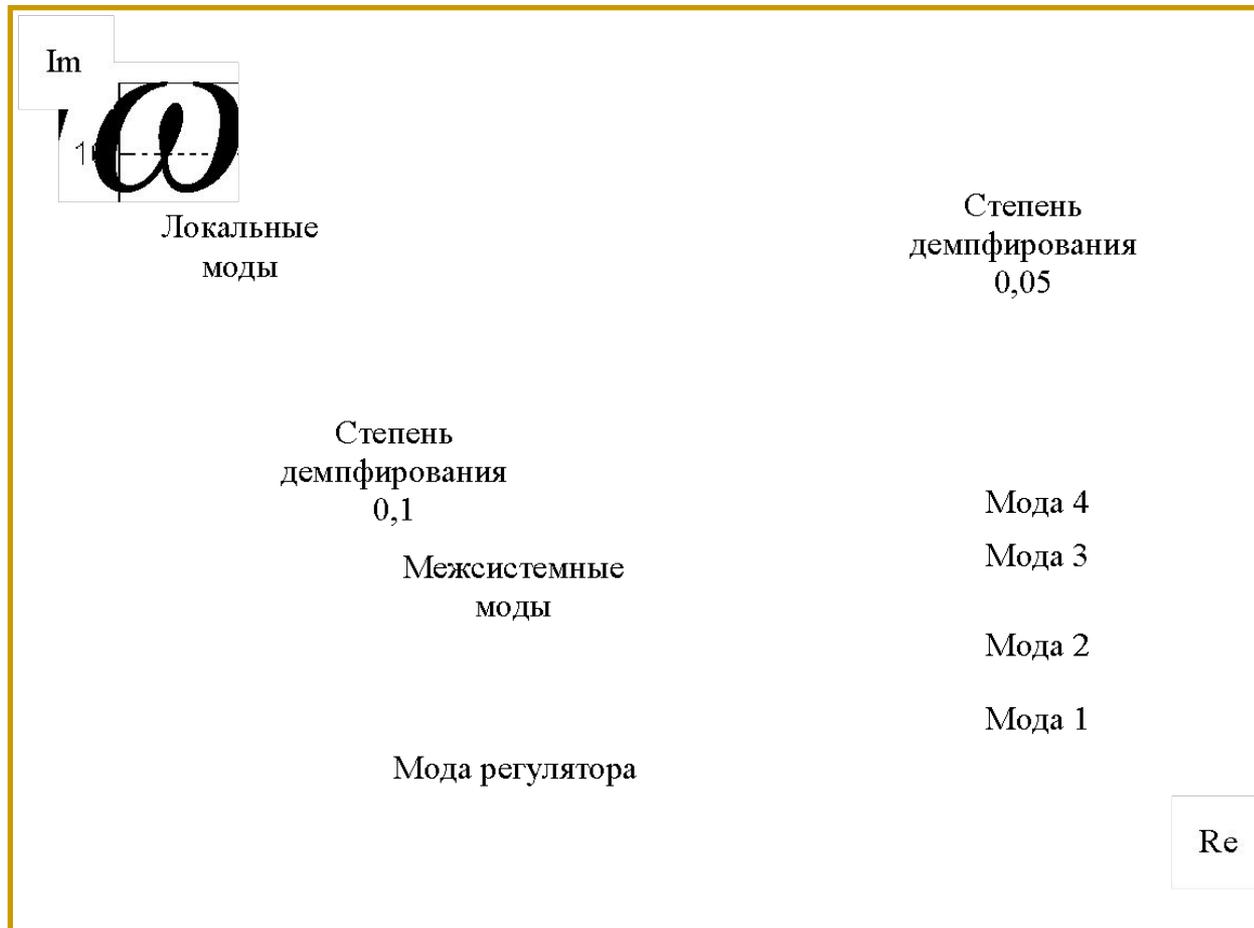
# ПАУ, обеспечивающее статическую устойчивость энергосистемы



$$u = Kx$$



# Моды колебаний ОЭС Центра (фрагмент)

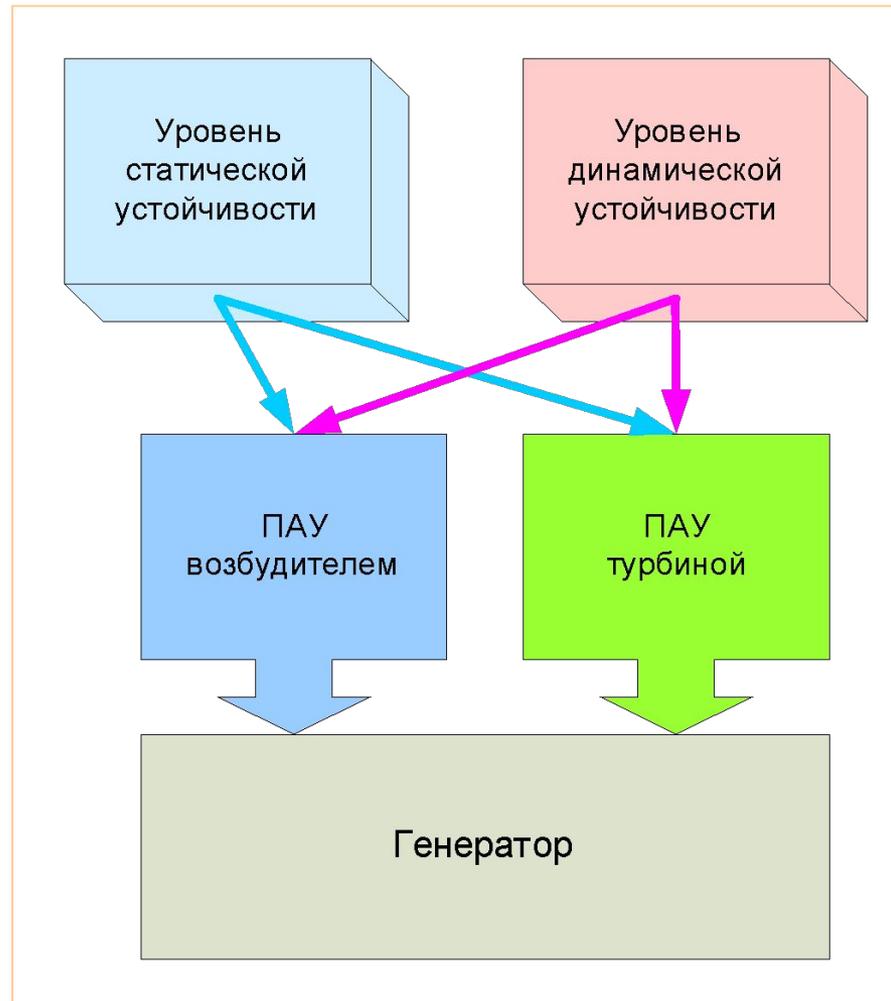




- приставки к АРВ (форсировка и расфорсировка)
- системные стабилизаторы (PSS – Power System Stabilizer) для управления колебаниями в ЭЭС, управления крупными синхронными и асинхронизированными синхронными компенсаторами, управления крупными электрическими машинами потребителей с целью сохранения устойчивости и демпфирования колебаний, управления мощными алюмине и сталелитейными печами
- противоаварийное управление турбинами электростанций (ГЭС, ТЭС, АЭС и др.)
- управляемые (гибкие) электропередачи переменного тока (FACTS – Flexible AC Transmission Systems) в сочетании с сверхпроводящими индукционными накопителями энергии (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage)



# ПАУ генератором

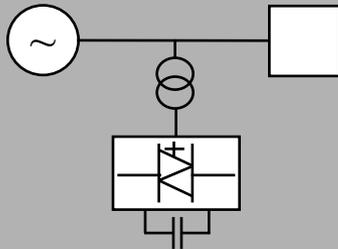


## STATCOM

**Static Synchronous Compensator**  
(статический синхронный компенсатор)

- Вентили GTO/IGBT
- Управление и защита
- Трансформатор
- Конденсаторы

$50 < U < 800$  кВ  
 $50 < Q < 800$  Мвар

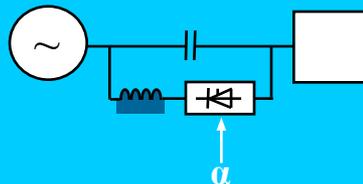


## TCSC

**Thyristor Controlled Series Compensation**  
(тиристорно-управляемое устройство продольной компенсации)

- Конденсатор
- Управление и защита
- Тиристорные вентили
- Выключатель

$220 < U < 800$  кВ  
 $100 < Q < 200$  Мвар

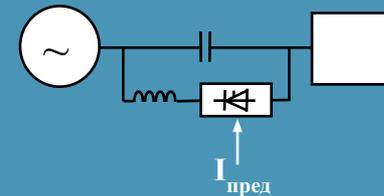


## TPSC

**Thyristor Protected Series Compensation**  
(продольная компенсация с тиристорной защитой)

- Конденсатор
- Защита
- Тиристорные вентили
- Выключатель

$220 < U < 800$  кВ  
 $100 < Q < 500$  Мвар



## Статическая устойчивость

$$u_{SSSC} = k_1 \frac{d}{dt} (U_i - U_j \cos q_{ij})$$

$$u_{STATCOM} = k_2 \frac{d}{dt} (U_j \sin q_{ij})$$

$$u_{TCSC} = k_3 \frac{d}{dt} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos q_{ij})$$

## Динамическая устойчивость

$$u_{SSSC} = r_1 \operatorname{sign} \frac{d}{dt} (U_i - U_j \cos q_{ij})$$

$$u_{STATCOM} = r_2 \operatorname{sign} \frac{d}{dt} (U_j \sin q_{ij})$$

$$u_{TCSC} = r_3 \operatorname{sign} \frac{d}{dt} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos q_{ij})$$



---

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Международная научно-техническая конференция

**Современные направления развития систем  
релейной защиты и автоматики энергосистем**

Москва, 7-10 сентября 2009